

永磁感应子式步进电动机静特性的计算方法

窦一平

(南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 介绍了永磁感应子式步进电动机静特性的场路结合计算方法, 建立了步进电动机的磁网络计算模型, 其中关键模型“齿层单元”采用二维磁场有限元来计算. 样机的实验验证表明, 采用场路结合算法, 数学模型简单实用, 并能满足工程计算精度的要求.

[关键词] 步进电动机, 永磁式电动机, 电磁场数值分析

[中图分类号] TM351, [文献标识码] B, [文章编号] 1672- 1292- (2003) 02- 0041- 05

0 引言

永磁感应子式步进电动机的静特性是指静态转矩和齿距角之间的关系, 是步进电动机的重要特性之一. 由于永磁感应子式步进电动机存在永磁体产生的轴向磁通, 和传统的电动机相比, 其作用机理和结构有显著的区别, 使得传统成熟的电机分析方法和计算模型无法直接应用. 随着电磁场数值计算技术的发展, 一种结合场和路各自优点而采用的场路结合计算方法得到了应用, 这种方法的特点是, 用二维电磁场数值计算解决一个齿距范围内齿层单元^[1]的磁场问题, 对通常的齿层尺寸范围和材料, 先计算出相应的磁层比磁导和比磁能数据, 再将磁层单元的磁导和电机其它部分构成一个非线性的磁网络, 这个磁网络能够较准确地反映电机内的电磁过程, 通过求解磁网络便可以计算出电机的特性. 本文将用这种场路结合的方法来计算永磁感应子式步进电动机的静特性.

1 齿层单元计算模型

图1为场路结合算法中的关键数学模型“齿层单元”. 文献[1]用电磁场数值计算的方法, 通过对具体样机的计算分析, 论证了齿层单元模型的工程合理性.

为了充分考虑定转子齿内磁场分布不均匀及变化的情况, 考虑材料的非线性, 较准确地计及饱和效应, 本文对样机“齿层单元”采用二维电磁场的数值计算方法, 具体计算模型请参见文献[1], 图2和图3是对样机“齿层单元”的计算结果, 图中 F 为齿层磁压降, w_f' 为齿层比能量. 从图中可以看出, 齿距角 θ 为 0° 时, 磁场受饱和影响最大, 磁导表现出非线性; θ 为 180° 即定转子齿槽相对时, 磁场受饱和影响最小, 磁导基本上为常数.

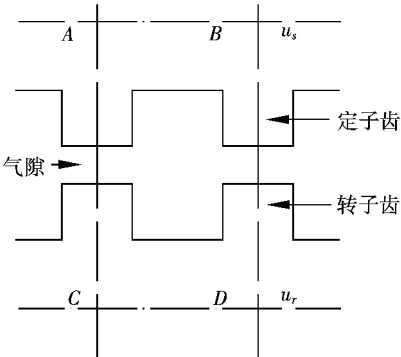


图1 齿层单元

2 磁网络计算模型

前面对“齿层单元”采用电磁场数值计算, 可以求出齿层的磁导参数, 将这部分磁导和电机磁路的其

收稿日期: 2003- 02- 24.
基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目(00KJD47001)资助.
作者简介: 窦一平, 1964-, 博士, 南京师范大学电气与电子工程学院副教授, 主要从事特种电机的研究.

它部分一起, 就可以构成电机整个磁系统的非线性磁网络模型, 在这个模型中, 磁系统的其它部分, 和一般电机一样, 用集中参数的磁路来考虑.

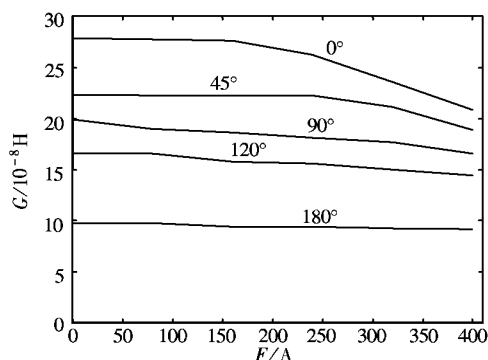


图 2 齿层比磁导曲线

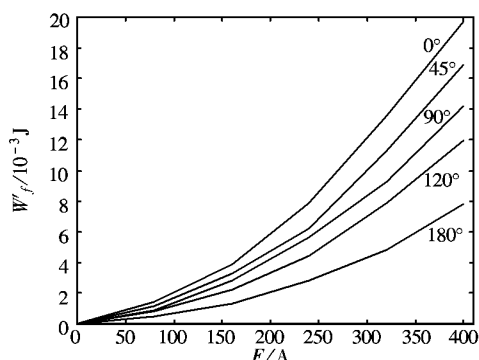


图 3 齿层比能量曲线

本文对文献[1]提到的一台实际的感应子式步进电动机样机进行分析, 该样机定子有 8 个极, 6 段转子铁芯, 3 块 AlNiCo5 磁钢, 磁钢轴向充磁, 主要结构参数参见文献[1], 样机的轴向剖面图如图 4 所示. 考虑到这种电动机的磁路对称性, 取一段转子半个圆周范围进行研究, 其等效磁网络模型如图 5 所示.

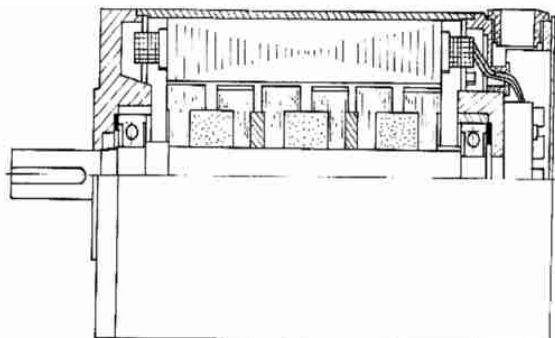


图 4 样机的轴向剖面图

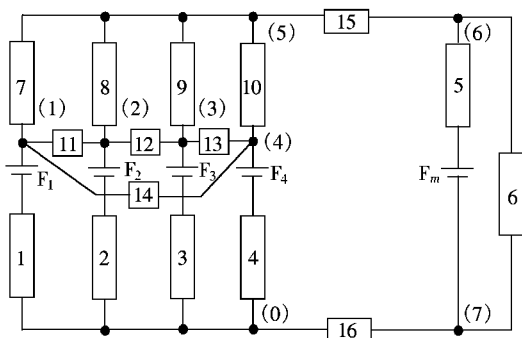


图 5 永磁感应子式步进电动机的磁网络模型

其中的磁网络参数, 包括磁导和磁势源的计算如下:

(1) 齿层磁导 $GF_i (i = 1, 2, 3, 4)$

在磁层结构尺寸确定的情况下, 它是定转子齿距角 θ 和齿层磁压降 F 的函数, 有:

$$GF_i = Z_s l G \left(F, \theta + \frac{2\pi(i-1)}{m} \right) \quad (1)$$

式中: m 为相数.

(2) 定子极身磁导 $GF_i (i = 7, 8, 9, 10)$

设极身磁压降为 F_p , 极身计算高度为 h_p , 极身有效截面积为 A_p , 则极身平均磁场强度 H_p 为:

$$H_p = \frac{F_p}{h_p} \quad (2)$$

由 H_p 查磁化曲线可以得到磁感应强度 B_p , 则磁导率 μ_p 和极身磁导 GF_i 为:

$$GF_i = \mu_p \frac{A_p}{h_p} = \frac{B_p}{H_p} \cdot \frac{A_p}{h_p} = \Lambda(F_p) \quad (3)$$

(3) 极间和磁钢的漏磁导 $GF_i (i = 11 \sim 16, 5, 6)$

它们是一些常数, 计算公式为:

$$GF_i = \mu_0 \frac{A_i}{l_i} \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率(求磁钢内磁导时, 磁导率用磁钢的回复磁导率 μ_m); A_i 为磁路有效截面积; l_i 为磁路计算长度, 按传统电机计算公式确定^[2].

(4) 磁势源

磁势源包括每极电励磁绕组的集中磁势源和永磁体的等效磁势源. 每极电励磁绕组的磁势 F_i 为:

$$F_i = N \times I_i \quad (5)$$

式中: N 为每极每相绕组匝数; I_i 为第 i 相的电流.

永磁体的等效磁势 F_m 为:

$$F_m = H_c \times l_m \quad (6)$$

式中: H_c 为永磁材料去磁曲线的等效磁感应矫顽力; l_m 为永磁体磁化方向的有效长度.

3 磁网络的解算

3.1 网络拓扑方程

由图 5 所示的等效磁网络模型, 按网络拓扑的节点法可以立出如下的方程组:

$$\begin{cases} (GF_{1+} + GF_{7+} + GF_{11+} + GF_{14}) \times U_1 - GF_{11} \times U_2 - GF_{14} \times U_4 - GF_7 \times U_5 = F_1 \times GF_1 \\ - GF_{11} \times U_1 + (GF_{2+} + GF_{8+} + GF_{11+} + GF_{12}) \times U_2 - GF_{12} \times U_3 - GF_8 \times U_5 = F_2 \times GF_2 \\ - GF_{12} \times U_2 + (GF_{3+} + GF_{9+} + GF_{12+} + GF_{13}) \times U_3 - GF_{13} \times U_4 - GF_9 \times U_5 = F_3 \times GF_3 \\ - GF_{14} \times U_1 - GF_{13} \times U_3 + (GF_{4+} + GF_{10+} + GF_{13+} + GF_{14}) \times U_4 - GF_{10} \times U_5 = F_4 \times GF_4 \\ - GF_7 \times U_1 - GF_8 \times U_2 - GF_9 \times U_3 - GF_{10} \times U_4 + (GF_{7+} + GF_{8+} + GF_{9+} + GF_{10+} + GF_{15}) \times U_5 - \\ GF_{15} \times U_6 = 0 \\ - GF_{15} \times U_5 + (GF_{5+} + GF_{6+} + GF_{15}) \times U_6 - (GF_{5+} + GF_6) \times U_7 = F_m \times GF_5 \\ - (GF_{5+} + GF_6) \times U_6 + (GF_{5+} + GF_{6+} + GF_{16}) \times U_7 = -F_m \times GF_5 \end{cases} \quad (7)$$

用矩阵形式表示为:

$$[G][U]^T = [\Phi]^T \quad (8)$$

式中: $[G]$ 为磁导矩阵; $[U]^T$ 为节点磁位列向量; $[\Phi]^T$ 为等效磁通列向量.

式(8)为非线性拓扑方程, 方程中的磁导 G 是节点磁位 U 的函数.

3.2 非线性拓扑方程的解法

解非线性拓扑方程常用的方法是迭代法, 本文采用松弛迭代法来求解方程(8). 该方法是先选取初始向量 X^0 , 用某个迭代公式, 求出一个新的向量 X^1 , 再用同样的迭代公式, 以 X^1 代替 X^0 , 求出 X^2 , 如此反复进行, 得到列向量序列 $X^0, X^1, X^2, \dots, X^K$. 若第 K 次迭代满足误差要求, 则认为迭代结束. 对于图 5 所示的磁网络, 可以首先令网络中的齿层磁导和极身磁导为线性磁导, 将方程(8)作为线性代数方程组求解一次, 然后用所得的节点磁位去计算所有的非线性磁导, 再求解线性方程组(8), 如此反复进行, 逐次逼近真实解, 直到满足精度要求. 本文迭代误差 ε^K 用下面(9)式计算:

$$\varepsilon^K = \sum_j \left| u_j^K - u_j^{K-1} \right| \quad (9)$$

4 步进电动机磁共能和静转矩的计算

4.1 齿层磁共能的计算

齿层磁共能的计算基于前面“齿层单元”场域解算中得到的比能量数据 W'_{fi} (W'_{fi} 的计算参见文献[1]), 在给定定子齿距角 θ , 以及齿层磁导两端磁压降 U 时, 不难计算出齿层磁共能 W_{fi} :

$$W_{fi} = ZslW'_{fi} \quad (10)$$

式中: Z_s 为定子每极小齿数; l 为铁芯有效长度.

4.2 其它磁路磁共能的计算

线性磁路的磁共能为:

$$W_{fi} = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{\Lambda_i} \quad (11)$$

式中: Φ 为线性磁路中的磁通; Λ_i 为线性磁路中的等效磁导.

极身磁路的磁共能按非线性方法处理, 由求出的极身磁路等效磁导的场量 H 和 B 值, 根据材料的磁化曲线, 利用数值积分求出 W_{fi} :

$$W_{fi} = V_i \int_0^H B dH \quad (12)$$

式中: V_i 为极身体积.

各磁路的磁共能对应于确定的定转子齿距角 θ 和绕组激磁电流 I (或等值磁势 F), 总的磁共能为各磁路磁共能之和:

$$W_f = \sum_i W_{fi}(\theta, F) \quad (13)$$

4.3 静转矩的计算

对应一定的绕组激磁电流 I , 在前面磁共能的计算数据基础上, 可以根据电磁场的虚位移原理来计算静转矩 T :

$$T = \left. \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \right|_{I=c} \quad (14)$$

数值计算中, 可以用差商代替微分求解:

$$T = \left. \frac{\Delta W_f}{\Delta \theta} \right|_{I=c} \quad (15)$$

保持激磁电流 I 不变, 计算出 θ 和 $\theta + \Delta\theta$ 时的磁共能值, 按式(15)便可以求出 θ 时的静转矩值. 改变 θ , 便可以计算出步进电动机的静特性 $T = f(\theta)$.

永磁感应子式步进电动机的静特性计算程序流程如图 6 所示.

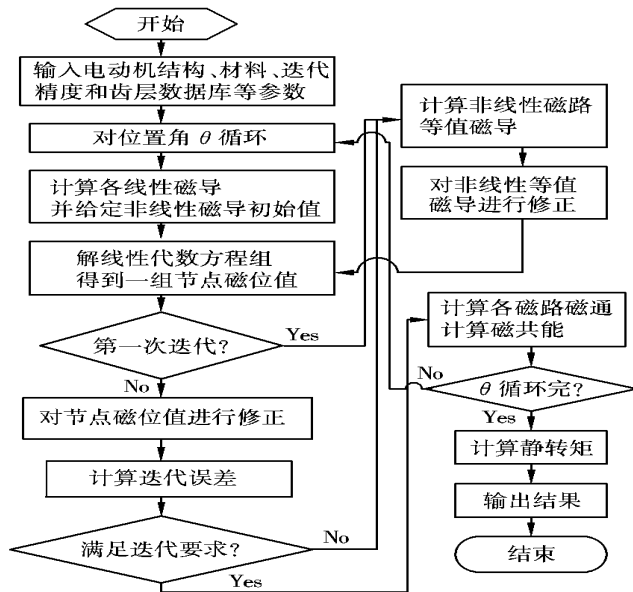


图 6 静特性计算程序流程图

5 实验验证

本文对文献[1]提到的一台永磁感应子式步进电动机的静特性进行了计算和实验验证. 样机的轴向剖面图如图 4 所示, 样机的主要结构参数参见文献[1]中的表 1.

“齿层单元”是一个齿距范围, 在定转子齿根后一个齿高处作平行线的长方形单元. 先从“齿层单元”的磁场数值计算得到齿层比磁导曲线和齿层比能量曲线, 如图 2 和图 3 所示. 再对整个电机的非线性磁网络用场路结合的方法进行静特性的计算, 计算流程见图 6 所示. 图 7 是样机一相通电, 激磁电流为 5 A 时, 静特性的计算和实测的比较图, 经过数据分析, 最大相对误差小于 10%. 造成误差的主要原因是“齿层单元”磁场计算采

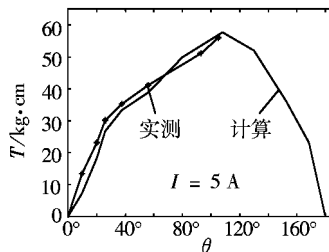


图 7 一相通电的静特性曲线

用的是二维平面场, 而电机实际磁场是三维的, 端部漏磁忽略不计了; 磁钢充磁后的实际磁化曲线和产品的标称曲线之间也有误差, 计算只能采用标称曲线数据; 另外, 由于场计算工作量大, 比磁导曲线的计算角度取值有限, 求两个离散角度中间的磁导和能量数值采用了线性插值的方法。但 10% 的相对误差能满足工程计算精度要求。

6 结论

用场路结合的方法来计算步进电动机的静特性, 对齿层单元用场的数值计算求参数, 而其它部分用路的方法求参数, 是分析计算步进电动机的一种有效方法。这种方法还为步进电动机的优化设计打下了较好的数学模型基础。

[参考文献]

- [1] 窦一平. 永磁感应子式步进电动机的场路结合算法及其工程合理性[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2002, (1): 5~ 10.
- [2] 哈尔滨工业大学, 成都电机厂. 步进电动机[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

On the Static Characteristic Calculation Model of Permanent Magnet Induction Stepping Motor

Dou Yiping

(College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The calculation method in combination with the magnetic field and magnetic circuit is presented in this paper to calculate the static characteristic of PM induction stepping motor. The magnetic network of the motor is established and the key calculation model, "The Tooth Layer Unit", is analyzed with the 2-D finite element method. The test and the calculation result to a prototype motor shows that the method is practical and effective and that the calculation model can meet the precision need of engineering.

Key words: stepping motor, permanent magnet motor, numerical method for electromagnetic field

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 7 页)

- [5] 高铁, 钱朝勇. TiO_2 光催化氧化有机污染物进展[J]. 工业水处理, 2000, 20(4): 10~ 13.
- [6] 杨阳, 陈爱平, 古宏晨, 等. 以膨胀珍珠岩为载体的漂浮型 TiO_2 光催化剂降解水面浮油[J]. 催化学报, 2001, 22(2): 178 ~ 180.
- [7] 陈士夫, 赵梦月, 陶跃武, 等. 玻璃纤维附载 TiO_2 光催化降解有机磷农药[J]. 环境科学, 1996, 17(4): 33~ 35.
- [8] 席北斗, 刘纯新, 孔欣, 等. 负载型催化剂光催化氧化五氯苯酚的效果[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 41~ 44.

Photo-catalytic Degradation of β -Naphthol by Supported TiO_2 Catalyst

Ding Haiyan, Wang Yuping, Xie Yun, Peng Panyang

(College of Chemistry and Environmental Science, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, PRC)

Abstract: Photo-catalytic degradation of β -naphthol in water was investigated using TiO_2 supported on activated carbon under irradiation of 250 W high pressure mercury lamp. Effect of illumination time, covered times, β -naphthol concentration, pH value on photo-catalysis were evaluated.

Key words: supported TiO_2 catalyst, photo-catalytic oxidation, activated carbon, β -naphthol

[责任编辑: 严海琳]